

# 2

## Revoluções tecnológicas e *general purpose technologies*:

Mudança técnica, dinâmica e transformações do capitalismo(\*)

Eduardo da Motta e Albuquerque

### Introdução

Há diversas elaborações sobre as transformações em curso: uma terceira revolução industrial (RIFKIN, 2011), uma segunda era das máquinas (BRYNJOLFSSON; MCFEE, 2014), uma terceira onda (THE ECONOMIST, 2014) ou uma quarta revolução industrial (SCHWAB, 2016). Adicionalmente, diversas publicações buscam discutir o impacto de uma nova onda de automação combinada com avanços na inteligência artificial (WORLD BANK, 2016; 2019; MGI, 2017). Como Schumpeter (1989, p. 247) observa, não é a primeira vez que isso acontece, pois, no final do século XIX, “*the New Industrial Revolution has become a very common phrase.*”<sup>1</sup> Essas publicações são evidências de mudanças em curso.

Revoluções tecnológicas reconfiguram o sistema capitalista. Mas as próprias revoluções tecnológicas têm uma dinâmica própria, que altera a sua velocidade, extensão e impactos. No sistema capitalista, a busca do lucro está diretamente associada à busca por inovações (SCHUMPETER, 1985, capítulo 2). O sucesso nessa

---

(\*) Esta nova versão articula o capítulo original com dois trabalhos subsequentes (ALBUQUERQUE, 2017; 2019) que desenvolveram temas específicos que complementam, atualizam e enriquecem a discussão da dinâmica de revoluções tecnológicas. Agradeço o apoio do CNPq (Processos 401054/2016-0, 307787/2018-4), do SENAI (Ordem de Serviço 510000011, Projeto IPEAD 159), o apoio dos bolsistas de iniciação científica Giulia Tonon, José Carlos Miranda e Tiago Camargo e as sugestões e comentários da Prof.<sup>a</sup> Márcia Rapini e da Prof.<sup>a</sup> Janaina Rufoni. Os erros são responsabilidade exclusiva do autor.

1. “A nova revolução industrial tornou-se uma frase muito comum” (SCHUMPETER, 1989, p. 247, tradução nossa).

busca está associado à obtenção de lucros extraordinários, um fenômeno apontado antes (MARX, 1984, capítulo 10) e depois (TEECE, 2010) de Schumpeter. Esses recursos financiam e motivam a ampliação das atividades ligadas à ciência e à tecnologia, mudança quantitativa que afeta a base das revoluções tecnológicas. Em um sistema com uma dinâmica expansiva como o capitalismo, esse motor fundamental de sua dinâmica não poderia ficar ileso a essas modificações. Esse processo é o que este capítulo busca rastrear, a partir de uma sistematização da literatura disponível.

O ponto de partida da discussão deste capítulo é o papel da inovação tecnológica na dinâmica do sistema capitalista: o papel central da inovação está colocado na elaboração de Schumpeter, sintetizado no célebre segundo capítulo de sua *Teoria do Desenvolvimento Econômico* (1911) – a inovação, em qualquer de seus cinco tipos básicos, está no centro da dinâmica do sistema, pois o lucro é resultado de uma inovação bem-sucedida implementada na economia. É a inovação que detona um conjunto de mudanças que está por trás do fenômeno do desenvolvimento – e sua lógica articulada ao cerne da ação no sistema capitalista: a busca do lucro. É a inovação que alimenta o processo de destruição criadora que caracteriza o sistema capitalista (SCHUMPETER, 1984, Capítulo 7).

Essa compreensão básica do papel da inovação na dinâmica capitalista organiza o roteiro deste capítulo, porque as inovações não são distribuídas de forma contínua ao longo do tempo, nem todas têm o mesmo significado. Uma combinação entre o caráter radical de uma inovação e o seu agrupamento em pontos específicos do tempo constitui a base da ocorrência periódica de revoluções tecnológicas ao longo da história do sistema capitalista, sistema que nasce de uma das mais profundas revoluções tecnológicas: a revolução industrial britânica.

O roteiro deste capítulo está organizado em torno da ideia das revoluções tecnológicas e de seu aprimoramento através da emergência do conceito de *general purpose technologies* (GPTs). Um conselho de Nathan Rosenberg (1976, p. 34) explica a Seção 1: a elaboração de Marx “*still deserves to be a starting point for any serious investigation of technology and its ramifications*”.<sup>2</sup> Marx (1984) será lido como um autor que, na discussão da revolução industrial – a emergência da maquinaria e da grande indústria – desenvolve um padrão de interpretação, indicando como uma inovação radical em um ponto estratégico da economia se espalha por todo o aparato produtivo e afeta o conjunto da economia. A Seção 2, por sua vez, apresenta a elaboração de Kondratiev (1979; 1998; 2004) sobre ondas longas

---

2.“ainda merece ser um ponto de partida para qualquer investigação séria da tecnologia e suas ramificações” (ROSENBERG, 1976, p. 34, tradução nossa).

e o papel da tecnologia e sua incorporação por Schumpeter (1989). O material histórico trabalhado por Kondratiev (1998) e por Schumpeter (1989) inclui duas revoluções tecnológicas posteriores à revolução industrial investigada por Marx. Em seguida, a Seção 3 combina uma avaliação de uma retomada do interesse no pós-guerra sobre a movimentação de longo prazo do sistema capitalista, em um mundo que assistia a uma quarta revolução tecnológica. Nesse contexto teórico, é possível indicar tanto a emergência da elaboração neo-schumpeteriana, como a origem do conceito de GPTs. A Seção 4, à luz dos debates do início do século XXI, apresenta uma sistematização das revoluções tecnológicas e explora a identificação da fase atual, aberta pela invenção da “world wide web” (www) em 1991. A Seção 5 investiga a relação entre a fase atual (pós-www) e a emergência de um conjunto de novas tecnologias candidatas a GPTs, com inúmeras possibilidades de combinação entre elas, além de resenhar uma discussão sobre o impacto potencial dessas tecnologias. Fechando o capítulo estão as Considerações Finais.

## 1. MARX E A REVOLUÇÃO INDUSTRIAL: UM MODELO PARA REVOLUÇÕES TECNOLÓGICAS POSTERIORES

No *Manifesto* de 1848, redigido com Engels, Marx indica o papel da inovação tecnológica no sistema capitalista e a forma como essa característica distingue este sistema dos anteriores:

[a] burguesia só pode existir com a condição de revolucionar incessantemente os instrumentos de produção, por conseguinte, as relações de produção e, com isso, todas as relações sociais [...] Essa subversão contínua da produção, esse abalo constante de todo o sistema social, essa agitação permanente e essa falta de segurança, distinguem a época burguesa de todas as precedentes (MARX; ENGELS, 1998, p. 24).

Um escrito da juventude, esse parágrafo pode ser lido como um tópico importante no programa de pesquisa de Marx, programa que foi completado parcialmente com *O Capital*.

A sistematização das contribuições de Marx para o estudo da tecnologia está além do objetivo desta seção - o leitor interessado pode encontrar excelentes revisões introdutórias em Rosenberg (1976; 1982). Entre a publicação do *Manifesto* e a primeira edição de *O Capital*, Marx avança substancialmente a elaboração sobre as particularidades dessa incessante revolução tecnológica que distingue o capitalismo dos sistemas anteriores - novas tecnologias provocam revolução no valor, a disputa pelos superlucros impulsiona a utilização de métodos mais modernos de produção e caracteriza a competição intercapitalista, a aplicação sistemática da ciência à produção transforma a natureza das forças produtivas.

Entre os avanços em *O Capital* está a elaboração sobre os mecanismos de propagação das mudanças tecnológicas – algo que Rosenberg (1982) trata como sequências compulsivas em um texto sobre orientações do progresso tecnológico. A apresentação de Marx sobre o desenvolvimento da maquinaria (Capítulo 13) pode ser lida como uma primeira descrição de revolução tecnológica. Desde os dois capítulos anteriores, Marx constrói um quadro dinâmico no qual o trabalho, sua divisão e sua produtividade vêm se alterando: cooperação e manufatura (descrita por Adam Smith) antecedem o capítulo sobre a maquinaria e a grande indústria.

Aqui, a evolução das máquinas é descrita por Marx, até chegar ao ponto de partida da Revolução Industrial:

A máquina da qual parte a Revolução Industrial substitui o trabalhador, que maneja uma única ferramenta, por um mecanismo, que opera com uma massa de ferramentas iguais ou semelhantes de uma só vez, e que é movimentada por uma única força motriz, qualquer que seja a sua força (MARX; ENGELS, 1998, tomo 2, p. 10).

Uma vez revolucionado o modo de produção em um ponto, o processo de sua difusão se inicia: “[o] revolucionamento do modo de produção numa esfera da indústria condiciona seu revolucionamento nas outras” (MARX; ENGELS, 1998, tomo 2, p. 15).

A descrição que Marx apresenta a seguir é uma didática elaboração sobre o processo de espalhamento de mudanças que caracterizou a Revolução Industrial, mas que também serve de modelo para outras revoluções tecnológicas, com as devidas adaptações. O processo começa em um ponto, na fição. O impacto deste começo não é pequeno – Carlota Perez (2010, p. 190) usa a expressão *big bang*, de forma muito apropriada, para descrever a natureza deflagradora de uma inovação radical. As consequências desse *big bang* são enormes, como descreve Marx:

[...] a mecanização da fição tornou necessária a mecanização da tecelagem e ambas tornaram necessária a revolução mecânica e química no branqueamento, na estampagem e na tinturaria. Assim, por outro lado, a revolução na fição do algodão suscitou a invenção do gin para separar a fibra de algodão da semente, com que finalmente tornou possível a produção em grande escala agora exigida. Mas a revolução no modo de produção da indústria e da agricultura exigiu também uma revolução nas condições gerais do processo de produção social, isto é, nos meios de comunicação e transporte (MARX; ENGELS, 1998, tomo 2, p. 15-16).

Portanto, uma inovação radical em um ponto estratégico da estrutura produtiva deflagra um conjunto de efeitos para frente e para trás, espalhando o processo revolucionário da agricultura aos meios de transporte. O processo, porém,

prossegue, na medida em que “o sistema de transporte foi, pouco a pouco, ajustado, mediante um sistema de navios fluviais a vapor, ferrovias, transatlânticos a vapor e telégrafos, ao modo de produção da grande indústria” (MARX; ENGELS, 1998, tomo 2, p. 16).

Esse ajustamento, por sua vez, determina novas demandas. Grande indústria, ferrovias, navios, prossegue Marx, “as terríveis massas de ferro que precisavam ser forjadas, soldadas, furadas e moldadas exigiam, por sua vez, máquinas ciclópicas, cuja criação não era possível à construção manufatureira de máquinas” (MARX; ENGELS, 1998, tomo 2, p. 16). Esse movimento determina um passo final: “[a] grande indústria teve, portanto, de apoderar-se de seu meio característico de produção, a própria máquina, e produzir máquinas por meio de máquinas. Só assim ela criou sua base técnica adequada e se firmou sobre os seus próprios pés” (MARX; ENGELS, 1998, tomo 2, p. 16).

Nesse processo, todos os setores da economia sofreram impactos e foram transformados. A revolução industrial se completa quando a forma de produzir máquinas passa a ser por meio de máquinas, um final de um processo que tem consequências revolucionárias também: com a maquinaria, há a substituição da “rotina empírica pela aplicação consciente das ciências da Natureza” (MARX; ENGELS, 1998, tomo 2, p. 17) - uma mudança decisiva no padrão de relacionamento entre a dinâmica científica e a tecnológica. Até este momento, as interações entre ciência e tecnologia estavam dispersas no tempo - a revolução científica (SCHUSTER, 1990) antecedeu a revolução industrial, uma forma de indicar influências indiretas, porém decisivas. Mokyr (1990) menciona pelo menos dois canais por onde a revolução científica se comunicou com a revolução industrial: 1) inventores e industriais britânicos estiveram em constante contato com cientistas durante a revolução industrial (p. 168); 2) a máquina a vapor seria impensável sem os insights de Torricelli e Guericke sobre a pressão atmosférica (p. 168).<sup>3</sup>

De qualquer forma, o que era difuso e sob um hiato intertemporal razoável, a partir da revolução industrial, com esse aspecto estrutural novo descortinado por Marx - aplicação consciente da ciência à produção - torna-se sistemático e articulado temporalmente. Tem-se um esboço da construção institucional descrita como sistemas de inovação pelos autores neo-schumpeterianos nos anos

---

3. Ver Suprinyak (2009). Para uma discussão atualizada da relação entre a revolução científica e a revolução industrial, ver Jacob (2014) e a avaliação crítica de Gráda (2016).

1980. Esse aparato institucional, por sua vez, inaugura um padrão de interação e de mecanismos de reforço mútuo entre a ciência e a tecnologia que impulsionará outras revoluções tecnológicas ao longo dos séculos XIX, XX e XXI. A crescente dependência das tecnologias em relação à ciência é outra característica das transformações do capitalismo nesses três séculos.

## 2. KONDRATIEV E SCHUMPETER: REVOLUÇÃO TECNOLÓGICA E ONDAS LONGAS NO DESENVOLVIMENTO CAPITALISTA

Entre 1919 e 1921, Kondratiev formulou a hipótese da existência de ondas longas na dinâmica econômica capitalista e, em 1922, publicou em Moscou o livro *The world economy and its conjunctures during and after the war*.<sup>4</sup> Para Kondratiev, um pesquisador de ciclos econômicos, “[t]he idea that the dynamics of economic life in the capitalistic social order is not of a simple and linear but rather of a complex and cyclical character is nowadays generally recognized” (1979, p. 519).<sup>5</sup> Ele resenha as discussões sobre ciclo, mencionando trabalhos sobre ciclos de oito a 11 anos de duração, trabalhos de Kitchin sobre ciclos mais curtos e trabalhos de Moor, Lescure, Aftalion, Spiethoff e Cassel sobre ondas longas. Conclui sua resenha da literatura, após listar polêmicas e ceticismo, sugerindo que “[t]here is, indeed, reason to assume the existence of long waves of an average length of about 50 years in the capitalistic economy, a fact which still further complicates the problem of economic dynamics” (1979, p. 520).<sup>6</sup> No restante, o texto apre-

---

4. Kondratiev (1979, p. 544) explicita a sua relação com outras elaborações em curso na década de 1920, similares à sua: “[o]nly at the beginning of 1926 did I become acquainted with S. de Wolff’s article ‘Prosperitäts- und Depressionsperioden’, *Der lebendige Marxismus, Festgabe zum 70. Geburtstag von Karl Kautsky*. De Wolff in many points reaches the same result as I do. The works of J. van Geldern, which de Wolff cites and which have evidently been published only in Dutch, are unknown to me”. [“Somente no início de 1926, eu conheci o artigo de S. de Wolff, ‘Prosperitäts- und Depressionsperioden’, *Der lebendige Marxismus, Festgabe zum 70. Geburtstag von Karl Kautsky*. De Wolff, em muitos pontos, alcança o mesmo resultado que eu. Os trabalhos de J. van Gelderns, citados por Wolff e que evidentemente foram publicados apenas em holandês, eram desconhecidos para mim” (KONDRATIEV, 1979, p. 544, tradução nossa). Posteriormente, Kondratiev inclui van Gelderen entre os teóricos que lidam com as ondas longas (KONDRATIEV, 1992, p. 423).

5. “[a] ideia de que a dinâmica da vida econômica na ordem social capitalista não é de caráter simples e linear, mas de caráter complexo e cíclico hoje em dia é geralmente reconhecida” (KONDRATIEV, 1979, p. 519, tradução nossa).

6. “Há aqui, realmente, elementos para supor a existência de ondas longas de duração média de cerca de 50 anos na economia capitalista, um fato que complica ainda mais o problema da dinâmica econômica” (KONDRATIEV, 1979, p. 520, tradução nossa).

senta evidências estatísticas relativas a essas ondas longas.

Com a publicação de textos inéditos no final do século XX (LOUÇÃ, 1999), a sofisticação e a riqueza dos insights de Kondratiev ficam mais evidentes.<sup>7</sup> Em outro texto de 1926, publicado em 1998, Kondratiev (1998, p. 38-41) discute quatro princípios empíricos fundamentando o desenvolvimento das ondas longas. O primeiro desses princípios sugere que:

[p]rior to the start of the rising wave of each cycle and sometimes at its start significant changes in the main conditions of economic life of society are observed. These changes are usually manifest [...] in far-reaching changes in manufacturing techniques and capacity [...], in changes in the conditions of monetary circulation, in a strengthening of the role of new countries in world economic life, and so on (p. 38).<sup>8</sup>

De forma mais direta, Kondratiev (1998, p. 49) sugere que a dinâmica das ondas longas tem entre os seus determinantes elementos aleatórios e condições e eventos tais como: “1 - changes in technology, 2 - wars and revolutions, 3 - the involvement of new territories in the orbit of the world economy, 4 - fluctuations in gold mining”.<sup>9</sup>

A seguir, Kondratiev associa cada um dos três ciclos longos com mudanças tecnológicas: revolução industrial no caso do primeiro (p. 39); aperfeiçoamentos no motor a vapor (1824), invenção da turbina (1824-7), cimento Portland (1824), entre outras mudanças associadas ao segundo ciclo (p. 39), e dínamo, motor a combustão, telégrafo, transmissão de energia elétrica como mudanças associadas ao terceiro ciclo (p. 40).

Um dos méritos de Schumpeter (1989) é incorporar a elaboração de Kondratiev e de seus insights sobre o papel da tecnologia nas ondas longas, enfatizando o papel central para as inovações na definição dos ciclos em geral – e das inovações radicais para a formação das ondas longas. Na verdade, desde 1911, com

---

7. Para o tema deste capítulo, é interessante destacar que Kondratiev (1992, p. 381) cita Schumpeter (1985), entre diversos autores relevantes para a discussão de ciclos. Aliás, como Louçã (1999, p. 191; 198) destaca, é impressionante a lista de autores discutida por Kondratiev (além de Schumpeter, estão Simmel, Keynes, Mitchel, Fisher, Marshall, Hansen).

8. “Antes do início da onda crescente de cada ciclo e, às vezes, no seu início, são observadas mudanças significativas nas principais condições de vida econômica da sociedade. Essas mudanças geralmente se manifestam [...] em mudanças de longo alcance nas técnicas e na capacidade de fabricação [...], nas mudanças nas condições de circulação monetária, no fortalecimento do papel dos novos países na vida econômica mundial, e assim por diante” (p. 38, tradução nossa).

9. “1 - mudanças de tecnologia, 2 - guerras e revoluções, 3 - o envolvimento de novos territórios na órbita da economia mundial, 4 - oscilações na produção de ouro” (KONDRATIEV, 1998, p. 49, tradução nossa).

o livro *Teoria do Desenvolvimento Econômico*, Schumpeter articulava a dinâmica cíclica da economia capitalista com a inovação tecnológica. No capítulo sobre os ciclos econômicos (Capítulo 6), Schumpeter (1985, p. 148) pergunta por que existem altos e baixos no desenvolvimento e responde: porque as combinações novas [...] aparecem [...] descontinuadamente, em grupos ou bandos. Se o aparecimento de novas combinações fosse contínuo, para Schumpeter (1985, p. 149), “as perturbações teriam importância apenas local e seriam facilmente superadas pelo sistema econômico como um todo”.

Se já na obra de 1911 (SCHUMPETER, 1985) a dinâmica cíclica da economia é determinada pela introdução de inovações, a contribuição de Kondratiev é incorporada por Schumpeter para dar conta da diferença na natureza das inovações e no seu agrupamento. No livro *Business Cycles*, Schumpeter parte da discussão do Capítulo 6 do *Teoria do Desenvolvimento Econômico* e, a partir desta síntese, introduz novas questões:

[...] if innovations are at the root of cyclical fluctuations, these cannot be expected to form a single wavelike movement, because the periods of gestation and of absorption of effects by economic system will not, in general, be equal for all innovations that are undertaken at any time (1989, p. 141).<sup>10</sup>

Há aqui um esforço de Schumpeter para diferenciar as inovações: “*innovations of relatively long span, less important innovations* (p. 141), *major innovations*” (p. 142).<sup>11</sup> Esse esforço de Schumpeter abre uma longa discussão entre pesquisadores da inovação sobre a natureza das inovações. Freeman (1994) apresenta uma síntese abrangente na proposta de uma tipologia de inovações, discriminando entre inovações incrementais e inovações radicais. Uma vez diferenciadas as inovações, Schumpeter discute sequências de ciclos, que se associariam a inovações radicais (*major innovations*) – “*major innovations hardly ever emerge in their final form or cover the whole field that will ultimately be their own*” (p. 142).<sup>12</sup> Exemplos de Schumpeter são as ferrovias, a eletrificação e a motorização

---

10 “Se as inovações estão na raiz das flutuações cíclicas, não se pode esperar que elas formem um único movimento semelhante a uma onda, porque os períodos de gestação e absorção dos efeitos pelo sistema econômico não serão, em geral, iguais para todas as inovações realizadas a qualquer momento” (SCHUMPETER, 1989, p. 141, tradução nossa).

11. “inovações de extensão relativamente longa, inovações menos importantes, inovações significativas” (SCHUMPETER, 1989, p. 141-142, tradução nossa).

12. “inovações significativas quase nunca surgem em sua forma final ou apresentando a abrangência que ao final alcançarão” (SCHUMPETER, 1989, p. 142, tradução nossa).

do mundo (p. 142). Há, assim, uma sequência de mudanças, exemplificada com o automóvel: “*the motorcar would never have acquired its present importance and become so potent reformer of the life if it had failed to shape the environmental conditions - roads, among them - for its own further development*” (SCHUMPETER, 1989, p. 142).<sup>13</sup>

O raciocínio de Schumpeter se completa com uma referência ao que ferrovias, eletrificação e motorização teriam em comum com a revolução industrial: algo além dos ciclos em si, há “*effects other than those which show in the cycles themselves*” (p. 143).<sup>14</sup> Em uma exposição que prefigura a próxima importante contribuição teórica de Schumpeter - o processo de destruição criadora (1942) -, exemplifica com as ferrovias um processo que demanda tempo - “*[i]t requires more time to bring into use the opportunities of production newly created by the railroad and to annihilate others*” (p. 143).<sup>15</sup>

Neste ponto Schumpeter pode justificar a decisão teórica de escolher três ciclos específicos para sintetizar as flutuações discutidas por ele. De uma forma que lembra a introdução do texto de Kondratiev (1979, p. 519-520), Schumpeter opta por ciclos curtos (Kitchin), ciclos industriais clássicos (Juglar) e ciclos de duração mais longa (Kondratiev). Para organizar a transição para os capítulos históricos do *Business Cycles*, Schumpeter (1989, p. 145) descreve os três Kondratiev que ocorreram até a edição do seu livro: o primeiro, de 1780 a 1842, corresponderia à revolução industrial; o segundo, de 1842 a 1897, a era do vapor e do aço, e o terceiro, a partir de 1898, o Kondratiev da eletricidade, da química e do motor. Nos capítulos históricos, Schumpeter apresenta dados e informações disponíveis para descrever cada uma dessas fases.

A elaboração de Kondratiev e a reinterpretação de Schumpeter ficam nítidas pela utilização no *Business Cycles* de praticamente a mesma periodização sugerida pelo economista russo no seu texto de 1926: Kondratiev (1979, p. 535) identificou estatisticamente três ondas longas, aproximadamente entre o final da década de 1780 e a década de 1920. Schumpeter articula uma

---

13. “o automóvel nunca teria adquirido sua importância atual e se tornado um reformador tão potente da vida se não moldasse as condições ambientais - estradas, entre elas - para seu próprio desenvolvimento” (SCHUMPETER, 1989, p. 142, tradução nossa).

14. “efeitos diferentes daqueles que aparecem nos próprios ciclos” (SCHUMPETER, 1989, p. 143, tradução nossa).

15. “requer mais tempo para colocar em uso as oportunidades de produção recém-criadas pela ferrovia e aniquilar outras” (SCHUMPETER, 1989, p. 143, tradução nossa).

relação entre agrupamentos de inovações radicais e cada uma dessas ondas: a sua raiz tecnológica estava incorporada na literatura econômica.

O que interessa a este capítulo não é tanto a importante e polêmica discussão sobre a existência de ondas longas e sua periodicidade, mas a identificação de revoluções tecnológicas capazes de impor à economia e à sociedade transformações tão profundas como as da revolução industrial. Kondratiev e Schumpeter tiveram, nas décadas iniciais do século XX, uma posição capaz de observar fenômenos estatísticos, históricos e econômicos que exigiram novas elaborações teóricas, como sugere Louçã (2007): metodologias para captar a pulsação da vida econômica no capitalismo.

Há, assim, mudanças em setores líderes, que demonstram outras mudanças, haja vista o papel decisivo de novas disciplinas universitárias - engenharias - e de descobertas científicas para as tecnologias do aço, da eletricidade, da química e do motor. A aplicação sistemática da ciência à produção alcança novos patamares, exigindo inclusive transformações estruturais na empresa, com o surgimento dos primeiros departamentos de pesquisa e desenvolvimento nas indústrias química e de eletricidade, no início da década de 1870.<sup>16</sup> Além dessas mudanças setoriais, o local da discussão do segundo e do terceiro Kondratiev muda. Enquanto Marx tratou da Inglaterra, Schumpeter discute também a Alemanha e os Estados Unidos. Enfim, mudanças de setores e de regiões.

### 3. ONDAS LONGAS E GENERAL PURPOSE TECHNOLOGIES: A CONTRIBUIÇÃO DA ELABORAÇÃO NEO-SCHUMPETERIANA

#### 3.1 Ondas longas na emergência da elaboração neo-schumpeteriana

Após 1945, a economia capitalista nos países centrais conheceria uma longa fase de expansão, que duraria até aproximadamente 1974. Um conjunto de inovações tecnológicas, amadurecidas durante e imediatamente após a Segunda Guerra Mundial, está por trás dessa nova onda expansiva da economia mundial

---

16. As diferenças nas periodizações devem ser ressaltadas. Marx (1867) investigou apenas a “maquinaria e a grande indústria”, combinando a mecanização da indústria têxtil e a emergência do motor a vapor. Kondratiev (1998) e Schumpeter (1989), buscando explicitamente periodizar distintas fases do capitalismo, separaram a revolução industrial da era do vapor e do aço. Perez (2010) reorganiza a periodização de Schumpeter, propondo uma era do vapor e das ferrovias seguida da era do aço, eletricidade e máquinas pesadas. Essas diferenças sugerem ao leitor um esforço para localizar temporal e institucionalmente cada autor - e as percepções possíveis em sua época.

- e essa longa fase de expansão é um dos consensos entre as diversas abordagens que buscam periodizar a história econômica do capitalismo global (ALBRITTON *et al.*, 2001).

Com o início do fim da fase expansiva das economias centrais nos anos 1970, a discussão sobre as ondas longas do desenvolvimento capitalista ganhou um novo impulso. Delbeke (1981) resenha *Recent long-wave theories*, mapeando a retomada do interesse pelo tema nesse período: Mandel (1982), Mensch (1975), Forrester (1977), Freeman (1977) e Rostow (1975). O livro editado por Freeman (1983), a partir de um número especial da revista *Futures*, é uma demonstração da ampliação do interesse sobre o tema e da riqueza da elaboração teórica em curso - e de um conjunto de diálogos que se abre entre essas diversas abordagens.

O conjunto das elaborações dos anos 1970 e 1980 é bastante diversificado, com uma vasta polêmica em torno da explicação da dinâmica de longo prazo dessas ondas. Entretanto, em todas as elaborações, o papel das novas tecnologias é crucial, mesmo quando elas não eram consideradas o principal fator causal dessa dinâmica.

Foi bastante representativa a participação de Chris Freeman, uma das bases da emergente elaboração neo-schumpeteriana nos debates sobre as ondas longas. Freeman participa desse vasto movimento com seu texto de 1977, como editor em 1981 do número especial da *Futures* e da sua posterior edição (ampliada) com o livro *Long waves in the world economy* em 1983, além de escrever *Unemployment and technical change: a study on long waves and economic development* em parceria com John Clark e Luc Soete, em 1982.

Freeman, ao lado de Richard Nelson, Nathan Rosenberg e Keith Pavitt, pode ser considerado um dos fundadores da abordagem neo-schumpeteriana. Certamente é o autor mais simpático ao esforço teórico relativo às ondas longas. A posição de Freeman na emergência da abordagem neo-schumpeteriana oferece uma singular posição teórica que permite, por um lado, importantes contribuições para as elaborações dessa corrente em formação - decorrentes do seu envolvimento com o esforço de compreensão da dinâmica de longo prazo da economia capitalista - e, por outro lado, decisivas contribuições da emergente economia da inovação para o debate das ondas longas - decorrentes de seu esforço teórico de compreender as forças motrizes da tecnologia, desde os seus componentes microeconômicos.

Essa posição singular pode ser exemplificada pelo texto de Chris Freeman e de Carlota Perez - *Structural crisis of adjustment: business cycles and investment behaviour* - no livro *Technical change and economic theory*, que foi a primeira síntese geral da abordagem neo-schumpeteriana, em 1988. Freeman e Perez (1988) apresentam uma síntese dos avanços da elaboração inspirada em Kondratiev, já

incorporando contribuições dos debates dos anos 1970 e 1980 entre pesquisadores das ondas longas e, ao mesmo tempo, incorporando todos os avanços da elaboração neo-schumpeteriana em consolidação.

Freeman e Perez (1988), por um lado, é um texto teórico capaz de incorporar a dinâmica das inovações tecnológicas no centro dos movimentos de longo prazo da economia capitalista. Esse texto contém uma combinação mais sofisticada da diferença entre os movimentos da inovação em si e de sua difusão por meio de um conjunto de inovações incrementais – já absorvendo as elaborações sobre paradigmas tecnológicos (DOSI, 1983) e sobre o papel das inovações incrementais (ROSENBERG, 1976; PATEL; PAVITT, 1994b). Ao mesmo tempo, Freeman e Perez (1988) destacam o papel de mudanças institucionais – simultaneamente pré-requisito e consequência das mudanças tecnológicas – por trás dos processos de desajustamento e reajustamento institucionais que se corporificam nas grandes crises da economia capitalista, momentos de transformação estrutural do capitalismo.

Por outro lado, é um texto de história econômica, que organiza um painel das quatro revoluções tecnológicas ocorridas até 1988. Trata-se de um painel rico de insights e de sugestões de pesquisa, por apresentar as quatro revoluções tecnológicas em seus diversos componentes estruturais, que incorporam desde as tecnologias líderes e emergentes, até a organização das firmas líderes e as estruturas de mercado, estrutura de financiamento das empresas e de suas inovações, países líderes e países emergentes, características principais dos sistemas de inovação mais importantes, elementos institucionais como organização dos Estados e de sistemas de bem-estar social, natureza do contexto geopolítico predominante (FREEMAN e PEREZ 1988, p. 50-56).

Além de sistematizar esses elementos estruturais das quatro ondas longas até então desenvolvidas, Freeman e Perez (1988) exploram características potenciais de uma nova revolução tecnológica aparentemente em curso, baseada nas tecnologias de informação e comunicação. Esse mesmo esquema é mais acabado em uma apresentação posterior (FREEMAN; SOETE, 2008, p. 65-70), na qual a onda longa relativa às tecnologias de informação e comunicação (TICs) já pode ser discutida com mais elementos empíricos e históricos.

Finalmente, Freeman e Louçã (2001) apresentam uma contribuição à elaboração das ondas longas que combina uma discussão teórica (Parte I: História e economia) com uma apresentação renovada e enriquecida do painel histórico (Parte II: Revoluções industriais sucessivas). Além disso, permitem uma nova incorporação das crescentes contribuições teóricas da elaboração neo-schumpeteriana com os desenvolvimentos históricos da nova fase relativa à revolução das TICs. Na sucessão das tecnologias centrais das cinco ondas longas – mecanização da indústria têxtil, máquina a vapor, eletricidade e química, motor a combustão e eletrônica e, finalmente, as tecnologias de informação e comunicação – há por trás uma crescente complexidade das tecnologias, *grosso*

*modo*, determinada por seu crescente conteúdo científico. Isso demanda um conjunto de articulações institucionais sintetizadas no conceito de sistema nacional de inovação – outro conceito central na elaboração neo-schumpeteriana que tem importantes contribuições na elaboração de Freeman (1988).

### 3.2 General purpose technologies e a contribuição de Rosenberg<sup>17</sup>

Nathan Rosenberg durante esses debates sobre as ondas longas permaneceu com uma postura cética, em especial ao cobrar mais elaborações sobre quatro questões básicas sobre a dinâmica das ondas longas: causalidade, timing, repercussões econômicas das inovações e recorrência (ROSENBERG; FRISCHTAK, 1983). Essas reflexões críticas vindas de um historiador das revoluções tecnológicas contribuíram para a emergência da elaboração sobre as *general purpose technologies* (GPTs) no final dos anos 1980 e início dos anos 1990. Pelo menos como uma referência importante, Rosenberg está ligado à origem desse conceito. Uma leitura do texto pioneiro da literatura de GPTs (BRESNAHAN; TRAJTENBERG, 1995) fornece alguns elementos para a identificação da influência de Rosenberg. Em primeiro lugar, Bresnahan e Trajtenberg (1995, p. 83) agradecem os comentários de Rosenberg às versões anteriores do texto. Em segundo lugar citam o livro *Inside the black box* diversas vezes, como apoio à ideia das GPTs (p. 84; 95). Em terceiro lugar, em uma nota de rodapé, os autores (1995, p. 84, nota 2) esclarecem que “[i]n defining innovational complementarities and understanding their role, we were strongly influenced by Rosenberg’s insightful 1979 essay, *Technological interdependence in the American economy*”.<sup>18</sup> Em quarto lugar, Bresnahan e Trajtenberg (1995, p. 86) indicam ao leitor uma versão maior deste texto (publicado em 1992 como *Working Paper da National Bureau of Economic Research*), que tem uma seção histórica com outras referências a Rosenberg.

Em 1998, E. Helpman edita o livro *General purpose technologies*. Para Helpman. “a drastic innovation qualifies as a GPT if it has the potential for pervasive use in a wide range of sectors in ways that drastically change their mode of operation” (p. 3).<sup>19</sup> A partir de um capítulo do livro, Helpman menciona uma caracterização baseada em quatro

---

17. Esta subseção está baseada em Albuquerque (2017).

18. “para definir complementaridades inovadoras e entender seu papel, fomos fortemente influenciados pelo perspicaz ensaio de Rosenberg de 1979, *Technological interdependence in the American economy*” (BRESNAHAN; TRAJTENBERG, 1995, p. 84, tradução nossa).

19. “uma inovação drástica se qualifica como GPT se tiver potencial para uso generalizado em uma ampla gama de setores, de maneira que mude drasticamente seu modo de operação” (HELPMAN, 1998, p. 3, tradução nossa).

características principais: “(1) *much scope for improvement initially*, (2) *many varied uses*, (3) *applicability across large parts of the economy*, (4) *strong complementarities with other technologies*” (p. 5).<sup>20</sup>

Esse livro é importante porque Rosenberg participa simultaneamente como autor do capítulo 7 e como referência bibliográfica em outros cinco capítulos. Na introdução, Helpman atribui a Bresnahan e Trajtenberg (1995) a autoria do termo *General Purpose Technologies* (GPTs).

O próprio Rosenberg, posteriormente, comenta de forma favorável os esforços dessa elaboração emergente:

In the first half of the 1990s economists were beginning to explore the notion that some technological innovations were of special significance because they provided building blocks upon which numerous other innovations were eventually constructed. That is, some technologies can be regarded as general purposes technologies (GPTs) because they provided technological capabilities that could be utilized in a large number of “application sectors”. Steam engines, machine tools, electricity, transistors, and computers all fall in this category (ROSENBERG, 2000, p. 80).<sup>22</sup>

Ao mesmo tempo, apresenta uma reconsideração da sua obra à luz dessa abordagem:

This way of thinking seemed eminently sensible and specially illuminating to someone who has long had a special interest in the history of technologies, and who had in fact written a paper many years ago that exploited the relationship between the introduction of a new class of machines - machine tools - and a wide range of subsequent applications (ROSENBERG, 2000, p. 80).<sup>23</sup>

---

20. “(1) inicialmente muito espaço para aperfeiçoamentos e melhorias, (2) muitos usos variados, (3) aplicabilidade em grandes partes da economia, (4) fortes complementaridades com outras tecnologias” (HELPMAN, 1998, p. 5, tradução nossa).

21. Uma indicação de um diálogo com a abordagem das ondas longas é a referência a textos de Freeman (às vezes com Perez) em quatro capítulos de Helpman (1998).

22. “Na primeira metade da década de 1990, os economistas começavam a explorar a noção de que algumas inovações tecnológicas tinham um significado especial porque forneciam bases sobre os quais várias outras inovações foram eventualmente construídas. Ou seja, algumas tecnologias podem ser consideradas como tecnologias de propósito geral (GPTs) porque forneceram recursos tecnológicos que poderiam ser utilizados em um grande número de ‘setores de aplicação’. Motores a vapor, máquinas-ferramentas, eletricidade, transistores e computadores se enquadram nessa categoria” (ROSENBERG, 2000, p. 80, tradução nossa).

23. “Essa forma de pensar parecia eminentemente razoável e especialmente esclarecedora para alguém que há muito tempo tem um interesse especial na história das tecnologias e que, de fato, havia escrito um artigo há muitos anos que explorava a relação entre a introdução de uma nova classe de máquinas - máquinas ferramentas - e uma ampla gama de aplicações subsequentes” (ROSENBERG, 2000, p. 80, tradução nossa).

Em uma nota de rodapé, Rosenberg indica aos leitores dois artigos: *Technological change in the machine tool industry*, escrito em 1963, and *Technological interdependence in the American economy*, escrito em 1979. Articulado esses textos com a literatura de GPTs, Rosenberg escreve:

This second paper, drawing in part on the earlier one, pays special attention to two issues of special significance in the latter GPT literature: the role of complementarities among technologies and the importance of interindustry complementarities (p. 116).<sup>24</sup>

A partir de 1998, Rosenberg escreve utilizando o conceito de GPT ao menos três textos, que abordam a engenharia química (Rosenberg, 1998), a eletricidade (ROSENBERG, 1998), e máquina a vapor (ROSENBERG; TRAJTENBERG, 2004).<sup>25</sup>

### 3.3 GPTs como um refinamento para a investigação das revoluções tecnológicas

Dosi e Nelson (2010, p. 66) identificam a posição específica das GPTs em relação às elaborações prévias sobre trajetórias tecnológicas:

[...] [h]ere as well as in Dosi (1982), we use the notion of paradigm in a microtechnological sense: for example, the semiconductor paradigm, the internal combustion engine paradigm, etc. This is distinct from the more “macro” notion of “techno-economic paradigm” used by Perez (1985; 2010) and Freeman and Perez (1988) which is a constellation of paradigms in our narrow sense: for example, the electricity techno-economic paradigm, ICTs, etc. The latter broader notion overlaps with the idea of “general purpose technologies” from Bresnahan and Trajtenberg (1995).<sup>26</sup>

---

24. “Este segundo artigo, baseado em parte no anterior, foca em duas questões de significado especial na literatura da GPT: o papel das complementaridades entre as tecnologias e a importância das complementaridades inter-industriais” (ROSENBERG, 2000, p. 116, tradução nossa).

25. A partir de 1995, o conceito de GPTs adquire vida própria, passando a ser referência para discussões em diversas áreas da economia. Dois exemplos são a presença de capítulos relativos a GPTs em *handbooks* de áreas como crescimento econômico (JOVANOVIĆ; ROUSSEAU, 2005) e economia da inovação (Bresnahan, 2010). O conceito de GPTs tem aberto uma possibilidade de diálogo entre diversas correntes da economia, talvez um caso singular de diálogo intradisciplinar - textos como Atkeson e Keohe (2007) demonstrariam isso, ao conter entre as referências tanto o livro de Helpman (1998) como um artigo de Rosenberg (*On technological expectations*, publicado em *Inside the black box*). Aghion, Akcigit e Howitt (2014, p. 551) utilizam o conceito de GPT e trabalhos de C. Freeman e chegam até mesmo a mencionar os ciclos de Kondratiev - perguntando sobre o que causaria as oscilações relacionadas a eles.

26. “[...] aqui, assim como em Dosi (1982), usamos a noção de paradigma no sentido microtecnológico: por exemplo, o paradigma dos semicondutores, o paradigma do motor de combustão interna, etc. Isso é distinto da noção mais ‘macro’ de ‘paradigma tecnoeconômico’ usado por Perez (1985; 2010) e Freeman e Perez (1988), que é uma constelação de paradigmas em nosso sentido restrito: por exemplo, o paradigma tecnoeconômico da eletricidade, as TICs, etc. A última noção mais ampla se sobrepõe à ideia de ‘tecnologias de propósito geral’ de Bresnahan e Trajtenberg (1995)” (DOSI; NELSON, 2010, p. 66, tradução nossa).

A elaboração sobre as GPTs constitui um importante passo para o aprimoramento das investigações das revoluções tecnológicas ao ampliar o escopo das mudanças tecnológicas radicais e por preservar o destaque da elaboração anterior sobre a complementariedade entre várias tecnologias que emergem de forma combinada e interdependente. O foco nas GPTs, e sua emergência no final dos anos 1980 e início dos anos 1990 pode também ser expressão de um elemento empírico novo, não captável na elaboração mais ampla sobre as revoluções tecnológicas na abordagem das ondas longas: a multiplicação de fontes para inovações radicais, uma consequência da difusão, crescimento e sofisticação dos sistemas de inovação cria condições para uma aceleração da dinâmica inovativa. Essa multiplicação de fontes, que tem como subproduto um conjunto muito maior de possibilidade de feedbacks positivos entre diversas instituições em diversos países, pode expressar-se em um número maior de invenções com impactos revolucionários em setores específicos da economia. Ao invés de uma combinação entre duas invenções-chaves como as de Arkwright e Watt, separadas por quase uma década no final do século XVII, agora há uma multidão de inventores e trabalhadores dedicados à ciência e à tecnologia distribuídos em empresas, universidades, institutos de pesquisa, gerando uma multiplicidade de inovações. Essa pluralidade de fontes potenciais de inovações radicais, mudanças podem estar ocorrendo no antigo sequenciamento de revoluções tecnológicas, pois agora elas poderiam começar a surgir simultaneamente - GPTs temporalmente justapostos, mas espacialmente distantes, pois países e/ou setores diferentes na origem de inovações radicais podem vir a se desenvolver. Muitas delas são importantes, com impacto suficiente para gerar perturbações importantes na dinâmica do sistema: a elaboração das GPTs permite captar essa multiplicidade. O resultado mais geral da contribuição teórica dessa elaboração é oferecer um cenário mais turbulento da dinâmica econômica de longo prazo, com perturbações importantes no sistema mais frequentes do que as inicialmente percebidas por Kondratiev e Schumpeter.<sup>27</sup>

---

27. Ribeiro *et al.* (2017a; 2017b), por meio da decomposição de uma série com a taxa de lucro para os Estados Unidos entre 1870 e 2011, encontram a superposição de um conjunto de ciclos na dinâmica de longo prazo da economia líder do capitalismo global no período analisado. Em termos da sua importância pela análise realizada, tem-se ciclos de 23 anos, 20 anos, 35 anos, um conjunto de ciclos menores e, com menos peso estatístico, um ciclo de 70 anos. O que quer se destacar dessa interpretação é a superposição de dinâmicas, importante para caracterizar o funcionamento da economia como um sistema complexo. Essa superposição, expressa na inexistência de um ciclo único, mas na combinação de diversos ciclos de duração distinta, parece ser decorrente da introdução simultânea de diversas inovações tecnológicas de impactos diferenciados.

## 4. REVOLUÇÕES TECNOLÓGICAS E A ABERTURA DE NOVAS FASES DO CAPITALISMO

### 4.1 Sistematização de cinco revoluções tecnológicas

A investigação da dinâmica econômica com foco nas revoluções tecnológicas que a moldam permite a formulação de um painel histórico para a identificação de diferentes fases do capitalismo.

A Tabela 1, preparada por Perez (2010), é uma das possibilidades de sistematização, e sintetiza tabelas mais detalhadas apresentadas por Freeman e Perez (1988, p. 50-56) e por Freeman e Soete (2008 p. 65-70).

Tabela 1 - Cinco revoluções tecnológicas				
Revolução tecnológica	Nome popular para o período	Big Bang inicial	Ano	País líder
Primeira	Revolução Industrial	Moinho de Arkwright é aberto em Cromford	1771	Grã-Bretanha
Segunda	Era do Vapor e das Ferrovias	Teste do Rocket, Locomotiva a Vapor na Ferrovia Liverpool, Manchester	1829	Grã-Bretanha (espalhando para Europa e EUA)
Terceira	Era do Aço, da Eletricidade e da Engenharia Pesada	Carnegie Bessemer, Fábrica de Aço é inaugurada em Pittsburgh, PA	1875	EUA e Alemanha avançam para a fronteira tecnológica, ultrapassando a Grã-Bretanha
Quarta	Era do Petróleo, do Automóvel e da Produção em Massa	Primeiro Modelo-T sai do papel na Ford em	1908	EUA (disputando com a Alemanha a liderança tecnológica mundial), posterior difusão para Europa
Quinta	Era da Informação e da Telecomunicação	Microprocessador da Intel é anunciado em Santa Clara, CA	1971	EUA (posterior difusão para Europa e Ásia)

Fonte: Perez (2010, p. 190).

Esse esquema é didático para explicitar a contribuição da abordagem neo-schumpeteriana para a sistematização de diferentes fases do capitalismo.

## 4.2 A fase atual: a www como novo big bang<sup>28</sup>

A invenção da www em 1991 é uma forte candidata à posição de uma inovação radical, também uma GPT, que representa o big bang de uma nova fase - seria a sexta revolução tecnológica, para acompanhar o esquema das cinco revoluções sucessivas apresentado na Tabela 1.

A invenção da www é decorrência do estado de construção de sistemas de inovação nos países mais avançados e inclusive de elementos rudimentares de um emergente sistema internacional de inovação - a instituição na qual a www foi inventada é internacional, o *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* (CERN) (GILLIES; CAILLIAU, 2000, p. 48-51). Pressupostos para a invenção da www foram a existência de um conjunto de universidades com capacitação científica e tecnológica em diversas áreas, especialmente ciências da computação, a existência de firmas com produtos e departamentos de P&D capazes de atender a uma demanda em construção sobre redes e sobre conectividade, a existência de milhares de profissionais capazes de implementar o funcionamento da redes em construção e impulsionar o gigantesco processo com vários momentos de invenção coletiva descrito por Greenstein (2015, p. 23; 405).

Em termos de uma discussão alinhada com ciclos de vida da indústria (KLEPPER, 1997) e evolução industrial (MALERBA; ORSENIGO, 1996), a invenção da www dependeu de um conjunto amplo de inovações anteriores na indústria de computadores. Grosso modo, a www é resultado de uma ampla gama de novos produtos e processos gerados a partir da emergência da computação eletrônica, iniciada com o computador ENIAC em 1946 (MALERBA; ORSENIGO, 1996, p. 68), passando por diversas fases entre o início da indústria de computadores comercial (início anos 1950, com a entrada da Remington Rand e da IBM na nova indústria) e a era atual. Chandler (1997), por exemplo, lista quatro períodos distintos nessa evolução industrial: transição da produção com finalidade militar para a produção comercial; o domínio do sistema IBM 360; a revolução do microcomputador e uma “possível era” de redes multicomputadores (p. 38-40). Chandler (2001, p. 168) acrescenta em seu capítulo sobre a revolução do microprocessador uma seção sobre “*software: networking*”, na qual descreve a invenção da www (p. 173). A combinação entre diferentes GPTs que se superpõem pode ser identificada na combinação nas mudanças na indústria de computadores com as mudanças na indústria de semicondutores (MALERBA; ORSENIGO, 1996, p. 74-76).

---

28. Esta subseção e a próxima seção estão baseadas em Albuquerque (2019).

A partir da difusão do uso de computadores ao longo das diversas fases descritas por Chandler Junior emerge uma sistemática preocupação e demanda sobre como conectar diferentes computadores e seus usuários. O conjunto desse processo está descrito por Greenstein (2015), com três fases iniciais. Primeiro o projeto de operar computadores em rede foi apoiado pela DARPA (p. 22-27): “[t]he internet developed slowly throughout the 1970s and the 1980s and accumulated capabilities overtime from an enormous number of contributors” (p. 23).<sup>29</sup> Segundo Greenstein, cinco grupos diferentes tiveram um papel importante: *Department of Defense (DoD)*, *National Science Foundation (NSF)*, programadores/desenvolvedores/inventores, administradores e usuários de aplicações (*application users*) (p. 23-24). Posteriormente, houve uma era com a rede sob a administração da NSF (p. 27-30). Finalmente, uma era que se inicia com a privatização do backbone da internet (a partir de 1995) (p. 32).

É nesse contexto que, entre 1989 e 1991, um cientista da computação institucionalmente localizado no CERN, Tim Berners-Lee, desenvolve o software que sustenta a http e a www (GREENSTEIN, 2015, p. 102-104).<sup>30</sup> A invenção da www permite uma utilização da internet muito mais intensa e mais ampla, uma pré-condição para a transformação comercial da internet - entre 1991 e 2018, o número de websites passou de 1 para 1,5 bilhões (possivelmente 200 milhões ativos hoje, segundo o site <http://www.internetlivestats.com/total-number-of-websites/>).

A invenção da www tem características de uma inovação radical na origem de um big bang de uma nova revolução tecnológica pelo enorme impacto causado nos inúmeros setores da atividade econômica. O crescimento da rede em si exige novos tipos de computadores - servidores, roteadores -, a ampliação do tráfego na rede multiplica possibilidades de usos e de invenções, novas mercadorias e novas firmas surgem para atender novas demandas.

O crescimento do número de websites viabilizados pela www criou um problema novo: como encontrar na rede em expansão, que rapidamente assumiria proporções gigantescas, as informações específicas procuradas por usuários individuais ou corporativos? Essa necessidade levou a outra invenção importante - o browser Mosaic, inventado em 1992 na Universidade de Illinois (GREENSTEIN, 2015, p. 97). A invenção e difusão da www amplia consideravelmente as possibilidades de uso por consumidores não especialistas (p. 223), a invenção dos browsers abre um mercado de acesso à internet (p. 143) e ilustra a possibilidade de criação de valor (p. 179).

---

29. “A internet se desenvolveu lentamente ao longo das décadas de 1970 e 1980 e ao longo do tempo acumulou capacidades de um enorme número de colaboradores” (GREENSTEIN, 2015, p. 23, tradução nossa)

30. Ver também <https://home.cern/science/computing/birth-web>.

Greenstein (2015, p. 163) identifica a origem da web comercial na IPO da Netscape – em 9 de agosto de 1995. A cadeia de eventos se acelera, com uma nova empresa (Netscape), mudança de estratégia de duas empresas estabelecidas – Microsoft reconhece o potencial econômico da internet (p. 304) e a IBM inicia uma reconfiguração para se ajustar à internet (p. 277). A bolha da dot.com é associada por Greenstein a essas promessas (p. 335-364) e alimenta muita experimentação e criação de empresas. Entre as empresas novas que recebem apoio de venture capital está a Google, empresa criada a partir de um algoritmo para buscas em um www que, naquele ano, em 1998, tinha cerca de 2 milhões de websites – uma empresa que focaliza na nova mercadoria criada nessa nova era: buscas na internet.

A estrutura da mercadoria básica na era da www – a busca – custeada por gastos de propaganda estabelece uma dinâmica também específica para empresas detentoras de mecanismos de busca (*search engines*), pois conforme avalia o *The Economist* (30/06/2018, p. 6), “[t]hat choice meant that they have to collect ever more data about their users. The more information they have, the better they can target their ads and more they can charge for them”. As implicações dessa dinâmica são enormes, pois “Facebook may have started as a social network, Google as a search engine, Microsoft as a maker of operating systems and other software. But today they all deal in data, not least to target advertisements” (p. 10).<sup>31</sup>

A expansão da www associa-se com uma enorme ampliação no uso de computadores (desktops e notebooks): 1 bilhão em 2008, 2 bilhões em 2015.<sup>32</sup> Inovações paralelas com o desenvolvimento de smartphones abriu outra área de expansão da www, com a inclusão de 3 bilhões de aparelhos em 2018.<sup>33</sup>

Um enorme desenvolvimento da infraestrutura de informação, pressuposto e consequência da emergência da www, reorganiza o conjunto da economia mundial, talvez ilustrada de forma bastante didática pelo número total de usuários da www – 3,9 bilhões –<sup>34</sup> e pelo total de buscas na www – apenas a Google em 2012 realizava 100 bilhões de buscas por mês, totalizando 1,2 trilhão naquele ano.<sup>35</sup>

O resultado da invenção da www e da cadeia de eventos – inovações comple-

---

31. “Essa escolha significa que eles precisam coletar cada vez mais dados sobre seus usuários. Quanto mais informações eles tiverem, melhor poderão segmentar seus anúncios e mais poderão cobrar por eles.” [...] Facebook pode ter começado como uma rede social, Google como um mecanismo de pesquisa, Microsoft como fabricante de sistemas operacionais e outros softwares. Hoje, porém, todos eles lidam com dados, principalmente para direcionar anúncios” (THE ECONOMIST, 2018, p. 10, tradução nossa).

32. <http://www.worldometers.info/computers/>

33. <https://venturebeat.com/2018/09/11/newzoo-smartphone-users-will-top-3-billion-in-2018-hit-3-8-billion-by-2021/>.

Em 2018 o tráfego nos websites através de smartphones alcançou 52,2% do total (<https://www.statista.com/statistics/241462/global-mobile-phone-website-traffic-share/>).

34. <https://www.statista.com/statistics/273018/number-of-internet-users-worldwide/>

35. <http://www.internetlivestats.com/google-search-statistics/>

mentares, efeitos para frente e para trás nas cadeias industriais e econômicas – por ela desencadeada é o estabelecimento de uma nova estrutura na economia mundial, uma nova camada para o processo econômico, um novo continente, digital, para a acumulação de capital – ocupado por empresas líderes em capitalização de mercado (KAHLE; STULTZ, 2017, p. 74, dados para 2015).

## 5. A WWW E UMA NOVA GERAÇÃO DE TECNOLOGIAS EMERGENTES

A criação, crescimento e consolidação da www como uma nova estrutura no sistema complexo que é o capitalismo global passa a ser fonte de novas mudanças, de novas tecnologias e mesmo de novas áreas da ciência.

A emergência e consolidação da www potencializa a estrutura de P&D acumulada anteriormente. A dimensão dos recursos envolvidos em ciência e tecnologia globalmente é um resultado de décadas de construção de sistemas de inovação no mundo. Em 2010, segundo cálculos a partir de dados no site do Banco Mundial, o total de pessoas envolvidas com P&D alcançava 8,97 milhões, para um total de gastos em P&D (para 2014) de US\$ 1,8 trilhão (para um PMB de US\$ 105,76 trilhões, ambos pelo critério PPC), segundo a R&D Magazine. Globalmente foram publicados 2,199 milhões de artigos na Web of Science em 2013 e depositadas 2,888 milhões de patentes (WIPO, 2016, p. 7). Há uma multiplicação das fontes de inovação, derivadas do crescimento dos diversos sistemas de inovação em construção, captado por um conjunto de dados da WIPO (2016, p. 8): a China em 2015 foi a maior depositante mundial de patentes, de marcas e de designs. Essa massa de recursos disponíveis para a inovação, agora articulados globalmente pela www – articulação que chega a impactar os diversos sistemas de inovação com a emergência de rudimentos de um sistema internacional (RIBEIRO et al., 2018) – impulsiona a dinâmica do progresso tecnológico de forma nova.

### 5.1 Uma lista de tecnologias que podem virar GPTs

Há uma dinâmica específica que associa as empresas na www, usos iniciais de informação, acumulação de dados e novos usos potenciais. A revista *The Economist* chega a sugerir a emergência de uma nova economia baseada em dados (THE ECONOMIST, 2017, p. 3), o que pode ser algo impressionista no geral, mas uma indicação de uma nova característica da economia que merece ser analisada entre novas mudanças. Essa mesma matéria sugere uma dinâmica iniciada com inovações necessárias para geração de valor na www que provocam investimentos em inteligência artificial. Segundo a *The Economist*:

---

36. Deve ser adicionado aqui o total de desenvolvedores de aplicativos, uma nova fonte de inovações de produtos que se multiplicou com a ampliação e consolidação da www e suas inovações complementares.

[...] the value of data is increasing. Facebook and Google used the data they collected from users to target advertising better. But in recent years they have discovered that data can be turned into any number of artificial-intelligence (AI) or “cognitive” services, some of which will generate new sources of revenue. <sup>-37-38</sup>

Nessa mesma linha, explorando a conexão entre o desenvolvimento da *www* e inovações posteriores, a *www* está relacionada com uma explosão de dados disponíveis, fortalecendo áreas como *big data*, que articuladas com novas capacidades de processamento levam a novas possibilidades de avanços em inteligência artificial e *machine learning* - um exemplo desta interconexão está no processo de avanços nos algoritmos de tradução de textos, em uma competição que envolve empresas como a Google e a Baidu (LEWIS-KRAUS, 2016).<sup>39</sup> Em relação à robótica, o interesse da Amazon foi explicitado pela aquisição da Kiva Systems, em 2012 (AUTOR, 2015, p. 24), assim como o envolvimento da Google com carros sem motorista.

A relação entre o desenvolvimento da robótica e outros setores é exemplificado por Ford (2015, p. 4-5; 105), que mostra como um aparelho para um jogo desenvolvido pela Microsoft (Kinect, um “motion sensing input device”) foi apropriado por pesquisadores em universidades e por inventores individuais para dotar robôs de visão tridimensional. Esse tipo de articulação combinando inovações de várias áreas é um dos pontos fortes dos capítulos iniciais de Ford (2015), que enfatiza como essas articulações estariam por trás de uma dinâmica de crescimento exponencial da capacidade dos robôs. Entre outras combinações, Ford menciona *big data* e *machine learning* (p. 86).

É nesse contexto que a emergência de novas tecnologias pós-*www* pode ser analisada. A OECD (2016, p. 79) sumariza uma lista de 40 tecnologias potenciais e chaves que poderão desenvolver-se nos próximos anos. Nessa lista, inteligência artificial, *big data*, e robótica estão mencionadas, estabelecendo assim um vínculo entre a consolidação da *www* e novas tecnologias potenciais.

A OECD (2016, p. 77-112) divide as 40 tecnologias em quatro áreas distintas: digital, biotecnologia, energia + meio ambiente e novos materiais. Na área digital - por definição um subproduto da *www* - constam tecnologias emergentes

---

37. “[...] o valor dos dados está aumentando. O Facebook e o Google usaram os dados que coletaram dos usuários para direcionar melhor a publicidade. Mas, nos últimos anos, eles descobriram que os dados podem ser transformados em vários serviços de inteligência artificial (IA) ou ‘cognitivos’, alguns dos quais gerarão novas fontes de receita” (THE ECONOMIST, 2017, p. 3, tradução nossa).

38. Há uma sugestão de fases na história das empresas como Google, de acordo com a The Economist (2017), que demarca entre o início da busca online e o novo mundo da inteligência artificial.

39. Para uma avaliação da semelhança da origem da Google e da Baidu, ver Greenstein (2015, p. 369).

como inteligência artificial, internet das coisas (IoT), análise de *big data*, computação quântica, robótica, *grid computing*, computação em nuvem e *blockchain*. Na área de biotecnologias, bioimagens, biosensores e biochips, bioinformática, tecnologias de monitoramento de saúde, células tronco, neurotecnologias. Na área de energia + meio ambiente, agricultura de precisão, energia fotovoltaica, energia eólica, tecnologias de captura de carbono, micro e nanosatélites, *smart grids*. E, finalmente, na área de materiais avançados, nanomateriais, nanoaparatos, manufatura aditiva, nanotubos de carbono e grafenos.<sup>40</sup>

Uma das empresas mais importantes da era tecnológica aberta com o *big bang* da *www*, a Google, tem utilizado os lucros extraordinários derivados de sua liderança tecnológica para entrar em novos setores e investir em diversas tecnologias emergentes. Um artigo publicado recentemente (ARUTE *et al.*, 2019) apresenta um importante resultado obtido sob a liderança de pesquisadores da Google AI Quantum sobre a computação quântica, uma das áreas listadas pela OECD (2016, p. 79). Arute *et al.* (2019, p. 510) concluem sugerindo que “[a]s a result of these developments, quantum computing is transitioning from a research topic to a technology that unlocks new computational capabilities”.<sup>41</sup> Caso essa sugestão esteja correta, essa tecnologia pode ser uma GPT de peso bastante distinto das demais - uma conjectura para ser avaliada nas próximas décadas.

Esse conjunto de tecnologias emergentes e potenciais, com pesquisadores e envolvidos em P&D conectados pela *www* e em um contexto de um rudimentar sistema internacional de inovação emergente, pode estabelecer uma característica específica da nova fase: uma explosiva combinação de GPTs. Na medida em que uma tecnologia central - a *www* - articula uma estrutura nova no sistema por meio da qual diversos esforços se somam e se complementam, combinações de GPTs podem se ampliar significativamente.

## 5.2 Uma nota metodológica: revoluções tecnológicas e a criação e destruição de ocupações

O Relatório do Banco Mundial (WORLD BANK, 2019b) organiza uma resenha de estudos disponíveis sobre o impacto das tecnologias emergentes, em especial as

---

40. Essa formulação da OECD (2016) contextualiza a proposta de Schwab (2016), que se refere apenas a um conjunto limitado de inovações e tecnologias que têm o potencial de desenvolvimento e difusão nos próximos anos.

41. “Como resultado desses desenvolvimentos, a computação quântica está passando de um tópico de pesquisa para uma tecnologia que libera novos recursos computacionais” (ARUTE *et al.*, 2019, p. 510, tradução nossa).

promessas de uma nova onda de automação baseada em combinações de robótica, inteligência artificial e machine learning, para concluir que “[t]he wide range of predictions illustrates the difficulty of estimating technology’s impact on jobs” (p. 22).<sup>42</sup> No caso dos Estados Unidos, por exemplo, as previsões sobre o total de empregos sob risco de automação variam entre 7% e 47% (p. 22). O grau de incerteza quanto ao desenvolvimento das próprias tecnologias deve ser pesquisado. Entre pesquisadores de ponta na área de inteligência artificial, a chegada ao estágio da *general artificial intelligence* é objeto de enorme discrepância, segundo Ford (2018, p. 528). Entre 23 pesquisadores consultados, a média das respostas indica tal realização em 81 anos, com previsões que oscilam entre 11 anos e 182 anos. Essas estimativas, de economistas e de pesquisadores da inteligência artificial, ilustram o alerta de Rosenberg (1996) quanto à dimensão da incerteza em relação ao futuro de tecnologias: a ignorância seria o termo mais adequado.

A única certeza, mostram as seções anteriores, é a permanente revolução da base técnica na dinâmica capitalista. Essa dinâmica tem talvez mais dificuldades de previsão, porque ela envolve não apenas o elemento destrutivo das novas tecnologias, mas a necessidade de apreender as novas ocupações, indústrias, setores que emergem. Afinal, como Schumpeter sintetizou, trata-se de um processo de destruição criadora.

Os vários relatórios sobre os impactos da automação sobre os empregos tendem a tomar como dada, a destruição de ocupações e aparentemente invertem o esquema das revoluções tecnológicas (MGI, 2017, p. 90) – primeiro, ocupações são destruídas, depois nova demanda por trabalho é criada.

Seria importante discutir essa relação intertemporal, explicitando que em primeiro lugar vem a criação de novas indústrias, novos produtos, novos processos e depois, como consequência, a destruição de ocupações afetadas por essas inovações. Não custa revisitar a elaboração de Schumpeter (1984, p. 83), que sublinha essa dinâmica: “[t]he fundamental impulse that sets and keeps the capitalist engine in motion comes from the new consumers’ goods, the new methods of production or transportation, the new markets, the new forms of industrial organization that capitalist enterprise creates”.<sup>43</sup> Portanto, para a nossa investigação, o primeiro passo consiste na investigação desse conjunto

---

42. “A ampla gama de previsões ilustra a dificuldade de estimar o impacto da tecnologia nos empregos” (WORLD BANK, 2019b, p. 22, tradução nossa).

43. “O impulso fundamental que aciona e mantém o motor do capitalismo provém dos novos bens de consumo, dos novos métodos de produção ou transporte, dos novos mercados, das novas formas de organização industrial criados pela empresa capitalista” (SCHUMPETER, 1984, p. 83, tradução nossa).

de inovações que transformam a dinâmica do sistema econômico.

Nos vários documentos que avaliam os impactos potenciais das tecnologias emergentes há várias referências à redução do peso do trabalho no campo nos Estados Unidos ao longo do século XIX e no início do século XX. Uma formulação representativa é apresentada no relatório da McKinsey:

In fact, the large-scale shifts in employment that automation will enable are of a similar order of magnitude to the long-term technology-enabled shift in the developed countries' workforces away from agriculture in the 20th century. That movement did not result in long-term mass unemployment because it was accompanied by the creation of new types of work not foreseen at the time (MGI, 2017, p. 87).<sup>44</sup>

Esse movimento está descrito em Wyatt e Hecker (2006, p. 55): *"The two occupation groups of farmers (including farm managers) and farm laborers (including foremen) combined declined 96 percent as a proportion of total employment between 1910 and 2000, from 33 percent to 1.2 percent"*.<sup>45</sup> O que estava na base dessa movimentação, segundo Wyatt e Hecker?

Farm mechanization, most notably the replacement of horses and mules with gasoline-powered tractors of growing power and efficiency, greatly increased farm workers' productivity. So did improved fertilizers and pesticides, higher yield varieties of plants and breeds of animals, improved irrigation practices, more efficient farm management, and farm consolidation. Near the end of the century, genetically modified crops increased yields, reduced pesticide usage, and increased resistance to many pests and fungi (p. 55).<sup>46</sup>

Trabalho humano em outros (então novos) setores deslocando o trabalho em setores estabelecidos.

---

44. "De fato, as mudanças de larga escala no emprego que a automação permitirá são de uma ordem de magnitude semelhante à mudança de longo prazo da impulsionada pela tecnologia no século XX que retirou da agricultura a força de trabalho dos países desenvolvidos. Esse movimento não resultou em desemprego em massa a longo prazo, porque foi acompanhado pela criação de novos tipos de trabalho ainda não previstos na época" (MGI, 2017, p. 87, tradução nossa).

45. "Os dois grupos de ocupação de agricultores (incluindo gerentes agrícolas) e trabalhadores agrícolas (incluindo capatazes) combinados caíram 96% como proporção do emprego total entre 1910 e 2000, de 33% para 1,2%" (WYATT; HECKER, 2006, p. 55, tradução nossa).

46. "A mecanização agrícola, principalmente a substituição de cavalos e mulas por tratores movidos a gasolina, com crescente potência e eficiência, aumentou consideravelmente a produtividade dos trabalhadores agrícolas. O mesmo aconteceu com fertilizantes e pesticidas melhorados, variedades de maior rendimento de plantas e raças de animais, práticas de irrigação aprimoradas, gerenciamento mais eficiente de fazendas e consolidação rural. Perto do final do século, as culturas geneticamente modificadas aumentaram a produtividade, reduziram o uso de pesticidas e aumentaram a resistência a muitas pragas e fungos" (WYATT; HECKER, 2006, p. 55, tradução nossa).

Gordon (2016, p. 261-266) mostra como o trabalho na agricultura se transformou em função de inovações técnicas - colhedeira mecânica, transição da energia equina para o motor a combustão, tratores, etc. -, que precederam as mudanças na composição da força de trabalho na agricultura dos Estados Unidos - o estudo de empresas como McCormick Harvesting Machine Company contribui para a compreensão das causas industriais e tecnológicas do movimento de redução do total do emprego na agricultura, simultâneo à expansão de novas indústrias e novos serviços.

Há assim, um movimento em diversas dimensões, iniciado pela criação de novos produtos e/ou novos métodos de produção, que criam novas ocupações e novos postos de trabalho, movimento seguido pelo impacto desses novos produtos e/ou processos em setores estabelecidos, com sua transformação subsequente, a qual libera mão de obra que pode ser deslocada para esses novos setores ou para novas ocupações, possivelmente dependendo de esforços de educação e retreinamento - tarefas para o sistema educacional em geral e da educação técnica em especial.

Wyatt e Hecker (2006, p. 42) apresentam um exemplo mais recente, relativo à emergência da computação eletrônica, indicando o que significou a expansão de novas ocupações resultantes da emergência de novas ocupações:

Computer specialists grew 95 times as a proportion of total employment between 1960 and 2000, from 0.02 percent to 1.92 percent. Employment grew from 12,000 to 2,496,000. The rapid development of computer technology - both more advanced hardware and software and the growth of networks, including the internet - plus sharply falling computer prices led to the spread of computer use to almost all areas of the economy.<sup>47</sup>

Desde o ponto de vista de estudos de economia industrial, há inúmeros movimentos relacionados à gênese e desenvolvimento da indústria de computadores (MALERBA; ORSENIGO, 1996; CHANDLER JUNIOR, 1997), que se relacionam com novas áreas de pesquisas em universidades, novas firmas ou diver-

---

47. "Os especialistas em informática cresceram 95 vezes como proporção do emprego total entre 1960 e 2000, de 0,02% para 1,92%. O emprego cresceu de 12.000 para 2.496.000. O rápido desenvolvimento da tecnologia de computadores - tanto hardware e software mais avançados quanto o crescimento de redes, incluindo a internet - além da queda acentuada dos preços dos computadores levaram à disseminação do uso de computadores em quase todas as áreas da economia" (WYATT; HECKER, 2006, p. 42, tradução nossa).

sificação de firmas existentes, surgimento de novos cursos em todos os níveis (educação técnica, educação superior, pós-graduação) para apoiar as necessidades dessas novas empresas e desses novos setores. Em termos mais gerais, a literatura sobre ciclos de vida da indústria (KLEPPER, 1997) pode ser avaliada como fonte para a compreensão da emergência sistemática de novas indústrias (AGARWAL; GORT, 1996).

A literatura sobre a emergência de novas indústrias sugere uma dinâmica que envolve transformações industriais mais amplas, ao apresentar movimentos de integração e desintegração vertical – metamorfoses nas fronteiras das firmas – relacionados com o surgimento e desenvolvimento de produtores especializados de máquinas, componentes e materiais para essas novas indústrias –, uma dinâmica que pode ser captada a partir da conhecida taxonomia de Pavitt (1984) – fornecedores especializados se desenvolvem, contribuindo para alterar a estrutura de firmas estabelecidas, com movimentos ao longo do tempo que envolvem transferir para outras firmas a produção de certos estágios de seu processo produtivo (ver o caso da IBM e os computadores pessoais, analisado em Chandler Junior citado por Yoffie, 1997, e por Malerba e Orsenigo, 1996).

As observações metodológicas que compõem a problematização desenvolvida nesta seção podem ter implicações para a análise deste projeto de pesquisa. Porque esses complexos movimentos de criação de novos produtos, novas firmas, diversificação de firmas, metamorfoses nas fronteiras de firmas existentes, surgimento de empresas fornecedoras especializadas podem indicar impactos bem mais amplos do que os que parecem serem avaliados em relação às novas tecnologias emergentes e seus impactos sobre ocupações e empregos.

Por isso uma questão – estariam os autores como Berger e Frey (2015) captando todo o impacto na criação de novas ocupações desta forma? Globalmente? Esse ponto é importante, porque eles indicariam uma limitação nas novas tecnologias em termos da capacidade de criação de novas ocupações:

Yet, the magnitude of workers shifting into new industries is strikingly small: in 2010, only 0.5% of the US labour force is employed in industries that did not exist in 2000. Crucially, it is found that many new industries of the 2000s stem from the digital revolution, including online auctions, internet news publishers, social networking services and the video and audio streaming industry. Relative to major corporations of the early computer revolution, the companies leading the digital revolution have created few employment opportunities: while IBM and Dell still employed 431,212 and 108,800 workers respectively, Facebook's headcount reached only 7,185 in 2013. Because digital businesses require only limited capital investment, employment opportunities created by technological change may continue to stagnate as the US economy is becoming increasingly digitized. How firms and

individuals are responding to digital technologies becoming available is a line of enquiry that deserves further attention (BERGER; FREY, 2015, p. 8).<sup>48</sup>

A pergunta seria: quais as implicações gerais da digitalização da economia? Quais setores são afetados direta e indiretamente? Talvez a pergunta mais importante: a construção de uma economia digitalizada exige uma vasta infraestrutura de computadores, servidores, satélites, etc.: quem está construindo isso? Onde? Em que países?

A criação de novos produtos, novos processos e inovações organizacionais antecede todas as demais movimentações. O que precisa ser avaliado, após a descrição do lado criativo deste processo, é o seu impacto e, entre outros, o impacto sobre antigos setores industriais, firmas estabelecidas e ocupações. O efeito pode ser de remodelamento completo - velhos setores se adaptam às novas tecnologias, velhas ocupações demandam novas habilidades - ou destrutivo - eliminação de setores, firmas e ocupações. A investigação da relação entre as dimensões criativas, reformuladoras e destrutivas das novas tecnologias é importante para definir o resultado final.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Entre a revolução industrial e o início do século XXI, um vasto conjunto de transformações estruturais teve lugar na economia capitalista global. Muitas delas foram em consequência das revoluções tecnológicas que se sucederam. O resultado final é uma economia global de estruturas e camadas que compõem um sistema complexo mais diversificado, com mais variedade e com uma composição institucional mais vasta do que a da economia que originou o *big bang* relativo à revolução industrial britânica.

---

48. No entanto, a magnitude da mudança de trabalhadores para novas indústrias é surpreendentemente pequena: em 2010, apenas 0,5% da força de trabalho dos EUA é empregada em indústrias que não existiam em 2000. Fundamentalmente, verificou-se que muitas novas indústrias da década de 2000 decorrem da revolução digital, incluindo leilões online, editoras de notícias da internet, serviços de redes sociais e o setor de streaming de vídeo e áudio. Em relação às grandes corporações do início da revolução dos computadores, as empresas que lideraram a revolução digital criaram poucas oportunidades de emprego: enquanto a IBM e a Dell ainda empregavam 431.212 e 108.800 trabalhadores, respectivamente, o número de funcionários do Facebook atingiu apenas 7.185 em 2013. Como as empresas digitais exigem apenas investimento de capital limitado, as oportunidades de emprego criadas pelas mudanças tecnológicas podem continuar estagnadas à medida que a economia dos EUA estiver se tornando cada vez mais digitalizada. A resposta de empresas e indivíduos às tecnologias digitais é uma linha de investigação que merece mais atenção (BERGER; FREY, 2015, p. 8, tradução nossa).

## 6.1 economia capitalista global, mudanças na dinâmica das revoluções tecnológicas e novos desafios

Três mudanças cruciais se destacam. Em primeiro lugar, o conjunto dos centros dinâmicos impulsionadores de mudanças tecnológicas cresceu. Para além da alternância entre os países hegemônicos, basicamente a substituição do Reino Unido pelos Estados Unidos a partir da Segunda Guerra Mundial, há um crescente conjunto de países com capacidade de gerar inovações radicais. Em segundo lugar, há a combinação de efeitos mais ou menos retardados de diferentes *big bangs*, GPTs e de sua superposição. Em terceiro lugar, o crescimento e a institucionalização dos sistemas de inovação, que já começam a ganhar uma dinâmica internacional.

O resultado dessas três mudanças combinadas é uma dinâmica tecnológica distinta daquela que inaugurou o sistema capitalista moderno. Dados os recursos atualmente investidos em atividades de ciência e tecnologia e o total de profissionais alocados nessas atividades, há uma aceleração na geração e difusão de novas tecnologias. Devido a essas múltiplas fontes e seu espalhamento geográfico, existem inúmeras possibilidades de superposição de GPTs e tecnologias emergentes, o que parece caracterizar o horizonte de mudanças tecnológicas nas próximas duas décadas.

Essa dinâmica de expansão de recursos, diversificação de fontes, aceleração e superposição de diversas tecnologias defronta-se com desafios, novos e velhos.

O primeiro é a superação da pobreza e da falta de acesso a todos esses importantes avanços gerados pela criatividade humana – um velho desafio, expresso infelizmente em crescentes níveis de desigualdade.

O segundo é a pressão das mudanças demográficas decorrentes da ampliação da expectativa de vida – a população mundial, especialmente nos países mais avançados, está vivendo vidas mais longas, uma consequência das revoluções tecnológicas que ampliaram a qualidade de vida – determina o surgimento de novas demandas no campo da atenção médica, de novos mercados de bens e serviços para populações mais longevas, reestruturação de sistemas de bem-estar social e determina uma pressão generalizada pela elevação da produtividade do trabalho – sendo esse um elemento central para responder a um novo cenário demográfico, dada a redução relativa da população em idade para trabalhar (MILLER, 2011).

O terceiro é a necessidade de enfrentar o desafio do aquecimento global, desafio decorrente da natureza de boa parte das tecnologias de paradigmas anteri-

ores, baseados no carvão e em combustíveis de natureza fóssil, que determinam a busca de uma transição para economias de baixo carbono (IPCC, 2014).<sup>49</sup> O desafio do aquecimento global recoloca em questão a própria definição de inovação, que não pode mais ser desvinculada de seu impacto ambiental. A eliminação dos elementos predatórios na dinâmica econômica deve ser uma prioridade para as atividades de ciência e tecnologia.

Esses três desafios estabelecem novas demandas sobre os sistemas de inovação, causa e consequência das revoluções tecnológicas e das GPTs. Essas novas demandas são apresentadas para uma enorme capacidade inovativa acumulada, pressionando por um processo de reorientação da direção do progresso tecnológico - tema para o qual Chris Freeman (1996) apresenta uma importante contribuição.

---

49. Uma forma de avaliar esse impacto é por meio das estatísticas de emissão de CO<sub>2</sub>, legado de revoluções tecnológicas baseadas fortemente no consumo de carvão e petróleo. Segundo o *The Economist (Special report on Climate Change, 28/11/2015, p. 12)*, até agora foram emitidos um total de 2.000 gigatoneladas de CO<sub>2</sub>, quando o limite para o aquecimento global não ultrapassar os 2°C seria de 3.200 gigatoneladas de CO<sub>2</sub> - algo que, mantidos os padrões tecnológicos atuais, seria alcançado em 30 anos.